

## 空间太阳望远镜星载 CCD 图像压缩单元的研究\*

贾志宏<sup>1,2</sup>, 耿立红<sup>1</sup>, 孙才红<sup>1</sup>, 金声震<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家天文台空间天文技术实验室, 北京 100012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对空间太阳望远镜(SST)卫星上海量的观测数据和在轨存储、下传能力有限的矛盾要求在轨压缩科学数据,本文在分析 SST 星载 CCD 图像压缩需求基础上,根据空间环境的限制和国内的设计研制能力,采用基于小波变换(DWT)和稀疏矩阵压缩的压缩算法,设计了星载压缩单元(DCU),并在 DSP 加 FPGA 结构的硬件平台上进行算法仿真和系统联试。测试结果表明,DCU 可以在 6 s 内对 2048×1024 pixels 的太阳图像进行大于 5 倍压缩,压缩信噪比(SNR)优于 26 dB,均满足 SST 图像压缩需求。DCU 实现了星载图像处理系统的国产化设计,已通过验收。

**关键词:**星载; CCD; 图像压缩; 小波变换; DSP

**中图分类号:**V447 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0086(2007)03-0285-04

## Compression Technique for onboard CCD Image of Space Solar Telescope

JIA Zhi-hong<sup>1,2</sup>, GENG Li-hong<sup>1</sup>, SUN Cai-hong<sup>1</sup>, JIN Sheng-zhen<sup>1</sup>

(1. National Astronomical Observatories, CAS, Beijing 100012, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract:**In the space solar telescope(SST) mission,because of the conflict of large volume of observation data and limited resources for store and transmission,the onboard data compression is needed. According to the requirements of data processing and the ability of native development,we adopt an in-line compression scheme. In this paper,the algorithm based on the wavelet transform is given and optimized on the hardware platform using DSP and FPCA. Data compression unit(DCU) can compress the solar images into 1/5 of original data and the processing time is less than 6 seconds,and the SNR is greater than 26 dB which satisfies the SST images requirements. DCU realizes the implement of native SDPU,which has passed the examination.

**Key words:**onboard; CCD; image compression; wavelet transform; DSP

## 1 引言

空间太阳望远镜(SST)以 0.1" 的超高空分辨率对太阳进行多波段协同、多工作模式和不间断的观测,原始观测数据率达 40 MB/s,每天的数据总量达 8640 GB。由于数据下传能力的限制,要求 SST 星上科学数据处理系统(SDPU)实时完成采集图像、辐射改正、几何改正、积分去噪、偏振计算和图像压缩等数据处理。

SDPU 的研制对我国航天星载计算机发展提出了重大挑战,因此采取与 ESA 对地遥测部和德国不来梅应用物理大学合作方式定义了概念架构。由于用 40 MHz 时钟的 DSP 压缩 2 MB 的图像要 32 s,德方提出了以数据存储单元为核心的离线压缩方案。但是 50 GB 的随机吞吐状态机星载固态存储单元<sup>[1]</sup>,目前国内没有设计研制能力。

SDPU 采用的在线压缩方案可以有效减少存储器的容量

和设计的复杂度,其中压缩单元(DCU)的处理速度和性能是该方案的关键技术之一。星上电子器件受可靠性和空间恶劣环境的影响,处理性能及时钟频率比地面落后几代。在上述限制条件下,本文采用基于小波变换(DWT)压缩算法和具有航天经历的 DSP 和 FPGA 器件,完成了满足 SST 高速海量图像处理要求的 SDPU 子单元—DCU,实现高速海量数据的在线实时处理,实现国产化 SDPU 样机的研制。

## 2 DCU 在 SDPU 的位置和设计要

## 2.1 SDPU 的组成

由于航天恶劣的空间环境限制了星载计算机处理器的发展,时钟主频一般小于 40 MHz,因此 SDPU 体系结构必然是针对不同载荷仪器和同一载荷的不同通道采用并行阵列数据处理。图 1 表示了 SDPU 的结构框图,压缩单元标记为灰色图框。

收稿日期:2006-05-18 修订日期:2006-07-18

\* 基金项目:国家“863”计划资助项目(863-2.5.2.25)

\*\* E-mail:jiazhong@hotmail.com

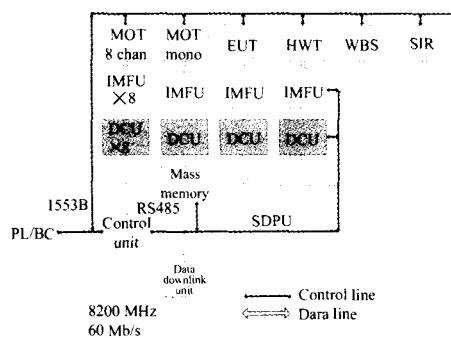


图1 SDPU在线压缩系统框图

Fig. 1 On-line compression system block of SDPU

SDPU 包括积分和预处理单元(IMFU)、DCU、存储器以及管理单元(CEU)组成,其设计采用了处理器阵列流水、控制流和数据流分开、在线压缩的思想。所有科学仪器观测获得的科学数据划分为 17 个并行处理阵列的数据通道,从而实现大量数据的实时处理。数控分流既保证了复杂控制管理的可靠性,又实现了高速数据处理的实时性。指令流是指 CEU 解析卫星平台(PL/BC)提供的指令,并控制其它有效载荷的工作模式,使各有效载荷协调工作。数据流则是从科学仪器观测得到原始数据,然后经过 SDPU 的各子模块,依次进行预处理(包括辐射改正、几何改正、偏振和积分)、压缩及存储。经预处理后的数据总量为 40.3 GB/day。再经 5 倍的压缩,数据总量为 8.06 GB/day,可以满足卫星下行数据量小于 10 GB/day 的需求。最后经数据下传单元 X 波段发射机发送给地面站。

### 2.2 数据压缩指标

SST 搭载 5 个科学仪器共使用了 15 个 CCD,其中主光学望远镜(MOT)是最主要的仪器,共有 9 个 CCD,观测从光球到色球的磁场结构<sup>[2]</sup>。MOT 包含 8 个偏振通道和 1 个单色通道,每天获得的数据总量占 SST 观测数据总量的 65%。因此,设计按照 MOT 的需求指标进行。

MOT 以 3 种观测模式,爆发模式、活动区模式和宁静模式,即 30 s、3 min 和 30 min 3 种时间分辨率进行连续观测。在 1 个观测周期内,每个通道的预处理单元生成 4 幅图像。由此采用在线实时压缩方式,对于 MOT 1 个通道 DCU 单元设计指标为:

输入图像大小为 2048×1024×2 B;进行 5 倍压缩,压缩信噪比(SNR)大于 26 dB;高局域可重构特点,以保证对太阳活动区域压缩后重构图像不损失主光望远镜的 0.1" 的瑞利极限分辨率;快速的数据压缩能力,要求 DCU 对每幅图的数据接收、图像压缩和数据发送的总时间小于 7.5 s;压缩方法应具有通用性,可以方便地应用于其它仪器的压缩过程。

## 3 压缩算法分析

### 3.1 研究现状

目前已经应用的遥感图像数据压缩技术压缩比较小。国外卫星上最早的采用的压缩技术是 DPCM,计算简单,但压缩比小且固定为 8:6;空间咨询委员会(CCSDS)提供的无损压缩标准,压缩比依赖于图像的特性,并且一般为 3 左右;法国的

SPOT 卫星采用了离散傅里叶变换(DCT)变换方法。目前,研究最多的是基于 DWT 压缩算法<sup>[3]</sup>。

### 3.2 基于 DWT 的压缩算法

图像的变换编码过程一般为:(图像输入)→变换→量化→编码→存储。变换的目的是对图像做解相关处理,如果不考虑计算误差,该过程是无损的和可逆的;解相关后的图像在变换域形成一系列小波系数,经对其进行整数量化后编码形成码流下传。量化过程是有损和不可逆的,图像的失真主要是该过程产生的。

基于 DCT 的算法是以丢掉了权重较小的高频分量为代价的,其结果是降低了重构图像的分辨率。MOT 的分辨率是直径 1 m 的光学镜片瑞利极限 0.1",丢掉了高频分量就降低了 MOT 的分辨能力。同时分块的方法使得恢复图像产生方块效应和蚊式噪声。DWT 是一种数学上的显微镜,它具有优秀的图像局域重构特点<sup>[4,5]</sup>。SST 的科学图像中,最感兴趣的是太阳活动区精细结构、太阳耀斑、本影及磁纤维主粒组织中的磁网络结构。传送到地面的图解压缩后必需对以上结构有良好的恢复本领,所以选择基于 DWT 的算法。

DWT 算法的几个具体问题<sup>[6]</sup>:1) 小波基的选择,主要考虑图像的固有统计信息,同时兼顾小波的正交性、对称性、支撑区间、光滑度和正则性,由于 SST 图像的比较大小,时序要求比较高,应综合考虑压缩效率和计算复杂度;2) 小波分解的层次,从子带信息量上看,当 1 个分子带分成 4 个子带,要求分成的 4 个子带的熵值的和很小,否则不值得再分解,一般选择 3 层、5 层或者 6 层<sup>[7]</sup>;3) 变换的计算方法,一般有 Mallat 算法和提升算法 2 种;4) SST 的图像特点是宽幅面 2048×1024 pixels,利用可分离的二维 DWT 对整幅图像变换,边界处理采用对称延拓方法。

SST 要求 5 倍压缩和大于 26 dB 的 SNR,这个要求并不高,大部分的小波基都可以实现,但是由于星上处理器的限制和运算的实时性要求,故选用滤波器长度短的 Daub 4 小波基。

### 3.3 DWT 快速算法

Mallat 算法<sup>[7]</sup>利用多分辨率分析概念,将信号或图像分解为不同频率通道,该算法的作用和地位相当于傅立叶分析中的 FFT。主要步骤是连续使用高通滤波、低通滤波和抽样的方法,如图 2 所示。

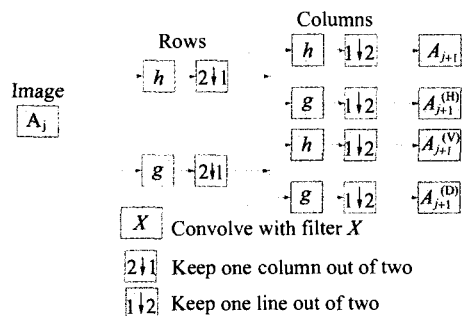


图2 二维 DWT 的 Mallat 算法

Fig. 2 Block diagram of Mallat algorithm for 2-D DWT

数学上的公式为

$$\begin{cases} C_{j+1} = HC_j \\ D_{j+1} = GD_j \end{cases} (j = 1, 2, \dots, J) \quad (1)$$

式中:  $H$  表示低通滤波器;  $G$  表示高通滤波器; 称  $C_j$ 、 $D_j$  为在  $2^j$  分辨率下的离散逼近和离散细节。

Mallat 重构算法为

$$C_j = H^* C_{j+1} + G^* D_{j+1} \quad j = J, J-1, \dots \quad (2)$$

其中,  $H^*$  和  $G^*$  为  $H$  和  $G$  的共轭。

Daub 4 小波的其低通滤波器  $h(z) = h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}$ , 高通滤波器  $g(z) = -h_3 z^{-2} + h_0 z^{-1} - h_1 + h_2 z^1$ 。其中:

$$h_0 = \frac{1+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_1 = \frac{3+\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_2 = \frac{3-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}; h_3 = \frac{1-\sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$$

提升算法<sup>[8]</sup>是一种新的双正交小波的构造方法, 这种方法使得计算复杂度大大降低, 有效地减少了运行时间, JPEG2000 已将提升算法列入标准。其基本思想分 3 个步骤: 分割、预测和更新。如图 3 所示, 把原序列分为奇偶两部分  $x_o$  和  $x_e$ ; 预测是由偶信号预测奇信号的预测值, 并得到预测误差; 更新是由奇信号的预测误差得到偶信号的预测值, 然后对偶信号进行校正。

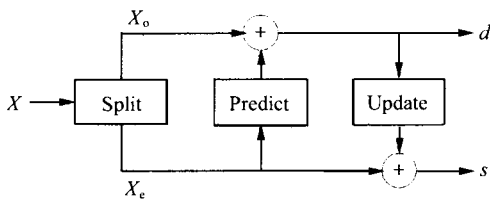


图 3 提升算法的步骤

Fig. 3 Block diagram of lifting steps

提升算法的实现是将低通和高通滤波器分解成一系列上三角或下三角矩阵, 从而将滤波器的实现转化为矩阵的联合乘积。因为多项矩阵是归一的, 分解可以是不同的, 既可以作为正变换又可以作为逆变换。对于 Daub 4 小波变换, 这对多项矩阵是

$$p(z) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\sqrt{3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{3} + \sqrt{3}-2}{4} z^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\tilde{p}(1/z)^t =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}+1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}-1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ z^{-1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3} + \sqrt{3}-2}{4} z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\sqrt{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

文献<sup>[8]</sup>从理论上给出: 如果设  $|h| = 2N$ 、 $|g| = 2M$ , 那么对于 1 对采样对, 进行乘法运算和加法运算的次数, 标准的 Mallat 算法为  $4(N+M)+2$ , 提升算法为  $2(N+M+2)$ 。根据 Daub 4 小波的计算公式, 可得 2 种算法分别为 14 和 9, 即后者比前者计算量减少了 56%, 因此采用提升算法实现 DWT。

### 3.4 编码方法

嵌入式小波零树编码(EZW)及基于集合划分的等级数编码(SPIHT), 利用了小波系数的空间自适应性构建比特平面; JPEG2000 采用的基于优化截断的嵌入式块编码算法(EBCOT)利用编码块进行后压缩率失真优化。这 3 种算法压缩性能很好, 但是量化、编码部分计算复杂, 需要多次的扫描小波系数<sup>[9]</sup>。

对于 20 MHz 的星载处理器时钟频率, 假设单周期可以对外存进行读写, 读写全部系数的过程共需要的时间是  $2048 \times 1024 \times 50 \text{ ns} \times 4 = 0.4 \text{ s}$ 。如果星载计算机反复的扫描、编码小波系数, 运算时间将不能实现 DCU 实时压缩处理的。所以采用了天文数据处理的基于稀疏矩阵的压缩算法, 并略去量化过程, 以提高算法的执行速度。

共需要扫描 2 次所有的小波系数。第 1 次计算阈值, 第 2 次扫描用阈值筛选小波系数, 保留主要系数, 不重要的系数的置零, 得到稀疏矩阵。用稀疏矩阵记录为 2 个数组:  $ija$  和  $sa$ 。这 2 个数组数据数目相等;  $ija$  记录小波系数的位置,  $sa$  记录小波系数的大小。比之其它编码方法, 减少了多次访问存储器的时间。

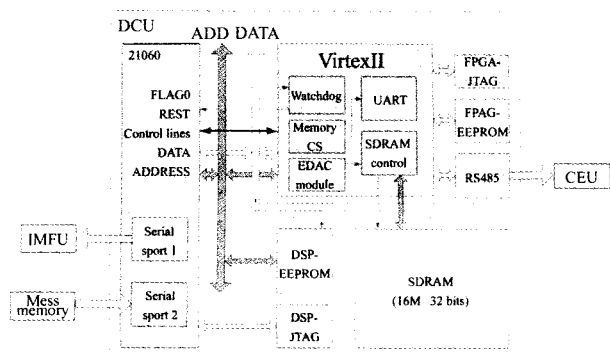
采用 Daub 4 小波提升算法和稀疏矩阵编码方法, 有效地减少了算法复杂度和执行时间; 算法仿真结果表明, 压缩比和 SNR 符合要求。

### 4 DCU 硬件设计

星上处理器有 3 种, 冯·诺依曼结构通用处理器、DSP 处理器和定制 ASIC 芯片方式。通用的处理器在完成高速海量数据处理性能不佳; 定制 ASIC 芯片的开发周期长, 一旦完成算法不易更改升级, 针对不同载荷仪器图像要求的算法可重构性能差。所以本文的硬件结构采用 DSP+FPGA 的结构。

DSP 选用 Analog Device 公司 SHARC 系列 AD-SP21060L<sup>[10]</sup>。该芯片具有可靠性和抗辐射性, 能良好适应空间环境。如在美国“海洋测绘观测”卫星上, 使用了 32 个 SHARC ADSP21060L 处理器阵列, 对光谱图像数据进行压缩处理。逻辑控制部分的 FPGA 芯片采用 Xilinx 公司的 XCS2V1000, 该款芯片采用 SRAM 工艺, 有丰富的资源, 还可以进行关键逻辑冗余、三模表决和硬件纠错逻辑等可靠性设计。

DCU 的结构框图和电路板实物图如图 4 所示。



(a)

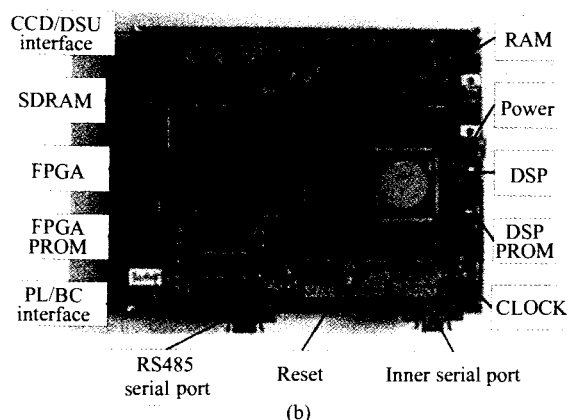


图4 (a) DCU 结构框图;(b) DCU 硬件电路图

Fig. 4 (a) The frame diagram;(b) PCB picture of DCU

DSP 接收控制计算机 CEU 的命令并解析,执行压缩处理任务,并将压缩结果传送到海量存储器;FPGA 则可以灵活地逻辑控制电路,包括 SDRAM 控制模块、串口控制模块和发送模块。此外,考虑恶劣空间环境对电子设备的单粒子效应和总剂量效应影响,FPGA 中设计了看门狗模块和纠错检错 EDAC 模块。

## 5 压缩算法测试和系统联调

### 5.1 压缩算法优化测试

ADI 公司为 ADSP SHARC 系列处理器提供了面向对象的软件开发平台 Visual DSP++。这个开发环境不仅支持汇编语言和 C/C++ 高级语言编程,并能查看编译后的机器代码,它还提供了功能强大的跟踪、时间统计工具,辅助开发者分析并优化程序。

DWT 计算量大而且需要反复的读写外部存储器,是压缩算法的瓶颈。为此,针对硬件特点对算法进行优化。优化措施包括:设置片内存储器 buffer,将大量读写操作在 buffer 中完成以提高读写速度;设置常用变量为寄存器变量;减少调用函数传递的参数;循环中将常数表达式移出循环。

### 5.2 SDPU 系统联调结果

以太阳光粒组织图、怀柔太阳磁场望远镜观测的太阳活动区磁场图和光球单色像图作为原始图像,模拟 SST MOT 获得的  $2048 \times 1024$  的太阳磁图。如表 1,DCU 的压缩时间和压缩效果很好地满足了 MOT 对数据压缩的要求。DCU 的压缩时间约是 5.53 s,压缩比为 5,压缩 SNR 为 32.97~42.99 dB(>26

表 1 图像压缩算法测试

Tab. 1 Test results of image compression algorithm

|                                 | Run time/s | SNR /dB | PSNR /dB | CR |
|---------------------------------|------------|---------|----------|----|
| Solar granulation image         | 5.53       | 28.72   | 32.98    | 5  |
| Active region magnetogram       | 5.53       | 39.21   | 42.94    | 5  |
| Photosphere monochromatic image | 5.53       | 43.97   | 49.50    | 5  |

dB)。在图 4(a)的硬件平台上,DCU 算法能在采样率最高的一个观测周期(30 s)内完成接收预处理单元的 4 幅太阳磁场图,同时压缩图像、向存储器发送压缩结果。图 5 表示了太阳活动区磁场图的测试结果,其中(a)为解压缩后的图像,(b)为原图。

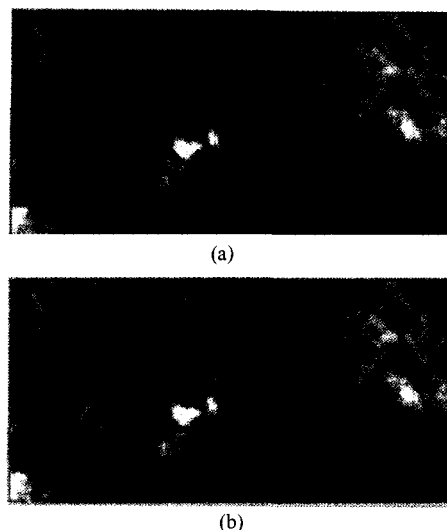


图 5 DCU 性能测试

Fig. 5 DCU performances test result

SDPU 双通道原理样机和 DCU 图像压缩单元均已经通过国防科工委、中科院技术局组织的专家组验收。

## 6 结论

设计的 DCU 模块,采用了基于 DWT 以及稀疏矩阵编码图像的压缩算法和 FPGA+DSP 的系统结构。DCU 的研制成功,不但满足了 SST 在轨图像处理的需求,而且有结构简单、灵活性好和可实时重组重构特点,提高了 SDPU 航天应用的可靠性。特别是 DCU 图像压缩时间只有 ESA 原有的 DSP 图像压缩时间的 1/5,可以实现科学数据的在线压缩处理,避免了 50 GB 的状态机型星上海量存储器的研制和脱机处理的复杂性,从而实现了 SST-SDPU 国产化研制。

SST 星上数据压缩算法和构件是解决高分辨率卫星图像与传输系统传输能力相矛盾的可行先进技术方,还可以广泛地应用到其它科学卫星、天基遥感遥测卫星等需要进行实时海量数据计算处理的卫星和航天器上。

### 参考文献:

- [1] WANG Fang, LI Ke. Development of onboard solid state recorder for space solar telescope[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(3): 472-475.
- [2] LI Yuan-zhang. *Introduction to Solar Physics* [M]. Beijing: Science Press, 2000. 12. (in Chinese)
- [3] Catherine Lambert-Nebout, Latry Christophe, Moury Gilles, et al. On-board compression for future high resolution remote sensing system [A]. *SPIE[C]*. 2000, 4115: 322-346.

- 13:118-124.
- [7] Hetherington D L, Grant R W, Hughes K L, et al. A portable low-power hydrogen gas sensor system for wide range H<sub>2</sub> detection[A]. *IEEE Circuits and Systems, Proc. 37th Midwest Symp* [C]. 1994, 199-201.
- [8] Favier R, Walter E C, Zach M P, et al. Hydrogen sensors and switches from electrodeposited palladium mesowire arrays[J]. *Science*, 2001, **293**:2227-2231.
- [9] Chtanov A, Gal M. Differential optical detection of hydrogen gas in the atmosphere[J]. *Sensors Actuators B*, 2001, **79**:196-199.
- [10] Villatoro J, Monzon-Hernandes D, Mejia E. Fabrication and modeling of uniform-waist single-mode tapered optical fiber sensors[J]. *Appl Opt*, 2003, **42**:2278-2283.
- [11] ZHANG Xiao-song, LI Lan, TAO Yi, et al. Preparation and Luminescence properties of ZnS:Zn, Pb thin film[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2005, **16**(9):1040-1044. (in Chinese)
- [12] Yang-Tse C, Yang L, Dan L S, et al. Preparation and characterization of Pd/Ni thin films for hydrogen sensing[J]. *Sensors Actuators B*, 1996, **30**:11-16.
- [13] Weiss M N, Srivastava R, Groger H, et al. A theoretical investigation of environmental monitoring using surface plasmon resonance waveguide sensors[J]. *Sensors Actuators A*, 1996, **51**:211-217.
- [14] Lin Y Z, Zhan J H, Tseng S M. A new method of analyzing the light transmission in leaky and absorbing planar waveguides[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1997, **9**:1241-1243.
- [15] Zhan J H, Tseng S M. Analysis of the light transmission of cylindrical double cladding[J]. *Japan J Appl Phys*, 1997, **36**:1390-1393.
- [16] Briks T A, Li Y W. The shape of fiber tapers[J]. *J Lightwave Technol*, 1992, **10**:432-438.
- [17] Villatoro J, Diez A, Cruz J L, et al. In-line highly sensitive hydrogen sensor based on palladium-coated single-mode tapered fibers[J]. *IEEE Sensors J*, 2003, **3**:533-537.

## 作者简介:

胡建东 (1965—),男,江西新余人,副教授,光学工程博士,主要研究光学传感技术。

(上接第 288 页)

- [4] ZHANG Li-bao, WANG Li-rong. Still image coding based on threshold segmentation using integer wavelet transform[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2004, **15**(2):212-200. (in Chinese)
- [5] GUO Ying-chun, HOU Zheng-xin. True 2-D wavelet filter bank and its application for image compression[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser* (光电子 • 激光), 2005, **16**(8):982-988. (in Chinese)
- [6] ZHU Xi-an, JIN Sheng-zhen. Wavelet analysis of space solar telescope images[J]. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2003, **3**(6):587-596.
- [7] Antonini Marc, Barlaud Michel, Mathieu Pierre, et al. Image coding using wavelet transform[J]. *IEEE Transactions of Image Processing*, 1992, **1**(2):205-220.
- [8] Ingrid Daubechies, Wim Sweldnes. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *Fourier Anal*, 1998, **4**(3):247-269.
- [9] David Taubman. High performance scalable image compression with EBCOT[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, **9**(7):1158-1170.
- [10] Bowles Jeffrey H, Antoniadis John A, Skibo Jeffrey, et al. On-board hyper spectral compression and analysis system for the NEMO satellite[A]. *SPIE* [C]. 1998, **3437**:20-28.

## 作者简介:

贾志宏 (1978—),女,山西太原人,博士生,研究方向为空间电子学和空间计算机。